

ENSAYO METODOLÓGICO PARA OPTIMIZAR LA CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE MENAS METÁLICAS. ESTUDIO DE UN CASO DE APLICACIÓN GEOMETALÚRGICA.

Laura Pérez-Barnuevo⁽¹⁾, Ricardo Castroviejo⁽¹⁾, Edgar Berrezueta⁽²⁾

(1) Universidad Politécnica de Madrid, ETSI Minas, c/Ríos Rosas 21, 28003 Madrid, (2) Universidad de Oviedo, c/San Francisco 1, 33003 Oviedo.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria minera no siempre se realiza un adecuado estudio previo de la relación entre la mineralización existente en el yacimiento y el tratamiento y concentración de la mena, lo que impide la optimización en los procesos y conduce hacia un mal procesamiento del mineral con consecuencias nefastas para el medio ambiente.

Para la optimización de estos procesos la Geometalurgia se apoya en la Mineralogía. La aplicación de la microscopía de reflexión permite la identificación, cuantificación y caracterización de las fases minerales presentes en secciones pulidas para de esta manera conocer la realidad de la mena tratada y su comportamiento. Y es aquí donde el empleo de Análisis Digital de Imagen (ADI) juega un papel importante como apoyo y complemento a la microscopía de reflexión, por introducir la automatización.

2. PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO

Este trabajo se ha realizado para comprobar la funcionalidad y el rendimiento del equipo de análisis digital de imagen (ADI) basado en tres bandas RGB en su aplicación a la caracterización y cuantificación de menas, mediante la aplicación de una metodología concreta diseñada por E. Berrezueta (2004).

A través de esta metodología se alcanza la puesta a punto del equipo y se obtienen los rangos de segmentación de las fases minerales a cuantificar. Completados estos dos pasos, se realiza el estudio de un caso concreto en el que a través de ADI se caracteriza y cuantifica una muestra de concentrados metálicos previamente analizada por un mineralogista experto a través del método manual del contador de puntos, de manera que los resultados derivados del estudio con sendos métodos puedan ser comparados, no solo desde el punto de vista de la cuantificación mineral en sí misma, sino también desde la perspectiva del coste económico y temporal que supone la aplicación de uno y otro método.

Por último, se incluye la descripción de las mejoras e innovaciones tecnológicas que se están desarrollando en la aplicación del análisis digital de imagen en microscopía óptica, de manera que pueden solventarse las dificultades surgidas al aplicar ADI basado en RGB.

3. PUESTA A PUNTO DEL EQUIPO DE ADI

Existen varios factores derivados del conjunto de elementos que conforman el equipo de ADI que requieren ciertas correcciones, a fin de conseguir unas condiciones de estabilidad que garanticen la reproducibilidad del método. En este sentido deben controlarse los siguientes factores:

- Deriva Temporal: Variación de la respuesta de la cámara en función del tiempo que tarda en alcanzar una estabilización en su temperatura. En el equipo de ADI dos son los elementos susceptibles de sufrir deriva temporal:
 - Cámara de vídeo 3CCD. Tiempo de precalentamiento 80 minutos.
 - Lámpara del microscopio. Tiempo de precalentamiento 40 minutos.

- Ruido: Se trata de la dispersión en la señal de salida de la cámara debida a varias causas: fotones, corriente y digitalización, entre otras. Para la disminución del ruido se realizan operaciones de promediado de imágenes, para lo cuál es necesario que el valor de las variaciones sea insignificante, o bien que la señal sea senoidal pura con período de recurrencia constante, siendo necesario en este caso un equipo estabilizador de tensión o SAI. El número de imágenes a promediar que mayor reducción del ruido consiguió es de 32 imágenes.
- Deriva Espacial. Variación de la respuesta en nivel de gris de un mismo objeto en función de su localización espacial bajo el microscopio. Se corrige aplicando una corrección propuesta por E. Pirard *et al.* (1999) en función de imágenes de patrones de alta y baja reflectancia.

Además del control de estos parámetros, durante la puesta a punto deben definirse otras condiciones de trabajo, como intensidad de iluminación (establecida en 6.5 V para evitar saturación en las fases más reflectivas), aumentos de trabajo (objetivo de 20 aumentos), intercalación de filtros (Azul, para corregir la tendencia al rojo de la luz blanca y Filtro Difusor para homogeneizar la iluminación, etc.

4. CARACTERIZACIÓN DE FASES MINERALES MEDIANTE ADI (RGB)

Obtenidas las condiciones de estabilidad del equipo de ADI bajo las cuales se puede garantizar la reproducibilidad de las medidas, el siguiente paso consiste en obtener los niveles de gris característicos de cada una de las fases minerales en estudio, es decir, los rangos de segmentación en cada una de las bandas Roja, Verde y Azul propios de cada mineral.

En primer lugar debe realizarse la identificación de la mineralogía presente en la muestra, que resulta ser: Bornita, Calcopirita, Calcosina, Covellina, Hematites, Magnetita, Molibdenita y Pirita.

Conocida la mineralogía, el proceso de caracterización comienza con un muestreo de los minerales cuyos rangos de nivel de gris (NG) se quieren obtener. Para ello se seleccionan granos de cada uno de los minerales con superficie homogénea (sin rayas de pulido, sin sombras, sin arranques, etc.). De cada uno de estos granos se toman medidas de NG de un número determinado de ventanas de muestreo de 10x10 *pixels*. Para que las medidas recogidas sean representativas de toda la muestra E. Berrezueta (2004) estableció en 40 el número mínimo de ventanas de muestreo.

Tras someter los datos obtenidos a un análisis estadístico se obtienen los rangos de segmentación que se muestran en la tabla 1.

MINERAL	R			G			B		
	Media	Desv. Est.	Rango de Segmentación	Media	Desv. Est.	Rango de Segmentación	Media	Desv. Est.	Rango de Segmentación
BORNITA	95.2	3.1	89 – 101	80.0	2.6	75 – 85	71.4	2.7	66 - 77
CALCOPIRITA	179.8	3.8	172 – 187	175.8	4.1	169 – 186	122.3	3.9	116 - 132
CALCOSINA	105.5	5.8	94 – 117	133.3	5.7	125 – 148	120.8	4.8	111 - 136
COVELLINA	36.6	5.8	25 – 48	56.7	5.5	46 – 68	77.7	4.9	68 - 88
HEMATITES	97.8	4.0	89 – 106	113.9	5.1	104 – 124	124.6	5.3	114 - 135
MAGNETITA	73.1	2.8	68 – 79	79.1	3.2	72 – 86	76.3	2.6	70 - 83
MOLIBDENITA	99.3	11.4	77 – 121	15.9	12.9	80 – 132	118.2	15.4	88 - 148
PIRITA	198.6	3.4	191 – 205	198.8	3.5	192 – 205	175.0	2.9	165 - 184

Tabla 1: Rangos de segmentación en cada una de las bandas R, G y B.

Para comprobar la validez de estos rangos de segmentación debe verificarse la existencia de una relación lineal entre el porcentaje de Reflectancia teórico (Criddle & Stanley, 1993), y los niveles de gris obtenidos para cada mineral por el equipo de análisis digital de imagen. La figura 1 muestra cómo, efectivamente, existe dicha relación lineal en cada una de las bandas Roja, Verde y Azul.

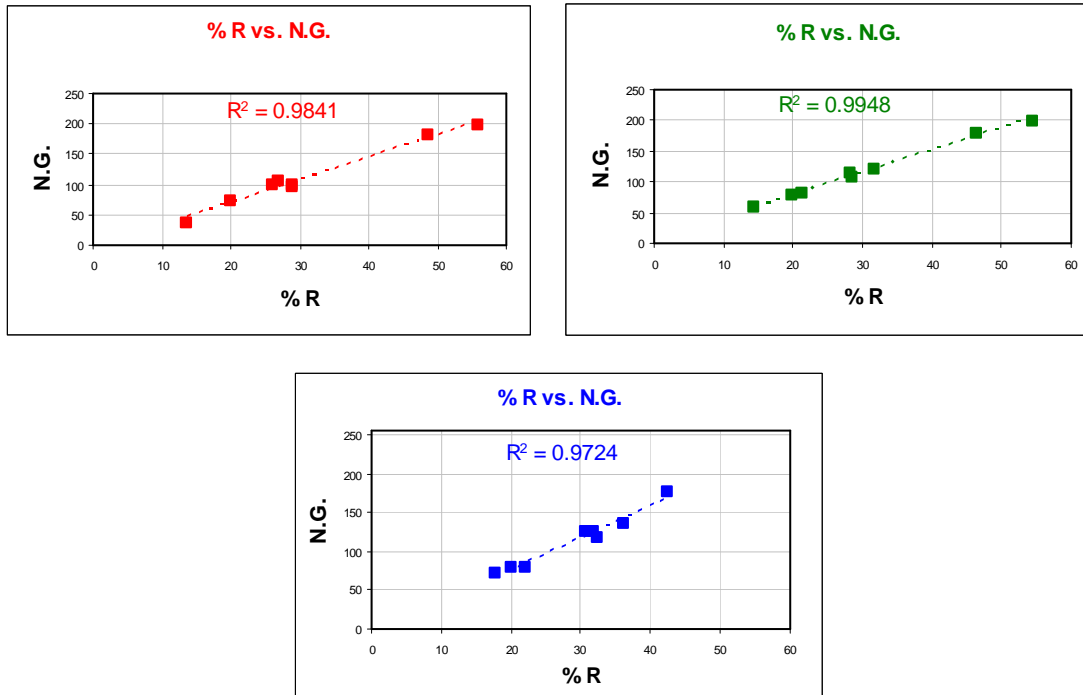


Figura 1: Relación lineal % Reflectancia vs. Niveles de gris.

A pesar de que los rangos de segmentación son perfectamente válidos, se observaron algunos defectos en el proceso de segmentación que se detallan a continuación.

- Imposibilidad de segmentar la ganga silicatada por la similitud de NG que presenta con la resina empleada en la fabricación de la probeta pulida.
- Bordes de grano no segmentados como consecuencia de la existencia de niveles de gris más bajos en la periferia de los granos, debido a un pulido insuficiente de las probetas para la aplicación de técnicas de ADI.
- Segmentación de los bordes de Molibdenita al aplicar los rangos de segmentación de Bornita, como consecuencia de un pulido insuficiente. Esta carencia del pulido se puede corregir aplicando una condición en la segmentación de Bornita: $R/B > 1$, es decir, el cociente entre el valor de NG de la banda roja entre el valor de NG de la banda azul es mayor que la unidad (ver tabla 1)
- Existencia de arranques minerales que compiten en NG con los valores característicos de Covellina, como consecuencia, una vez más, de un pulido insuficiente. La corrección de este defecto se consigue aplicando una condición en la segmentación de Covellina: $B/R > 2$, es decir, el cociente entre el valor de NG de la banda azul entre el valor de NG de la banda roja es mayor que dos (como puede comprobarse en la tabla 1)

Solucionados estos problemas se puede realiza la cuantificación mineral mediante ADI.

5. CUANTIFICACIÓN MINERAL: ADI vs. CONTADOR DE PUNTOS

El operador manual definió una malla de muestro tal que para un tamaño de 200 # el número mínimo de partículas a contar con el contador de puntos sea de 1 500. En el caso del Análisis Digital de Imagen, para reproducir las condiciones de muestreo establecidas para el contador de puntos y asegurar que se cuentan el mismo número de partículas, se definió una malla de muestreo de 500 nodos.

Los resultados de la cuantificación obtenida con ambos métodos se muestran en la figura 2, en la que se observa que la tendencia general de los datos obtenidos con ambos métodos es muy similar, y las diferencias no superan los márgenes de error previsible e inherente a la representatividad estadística de las muestras estudiadas (Castroviejo et al., 1999).

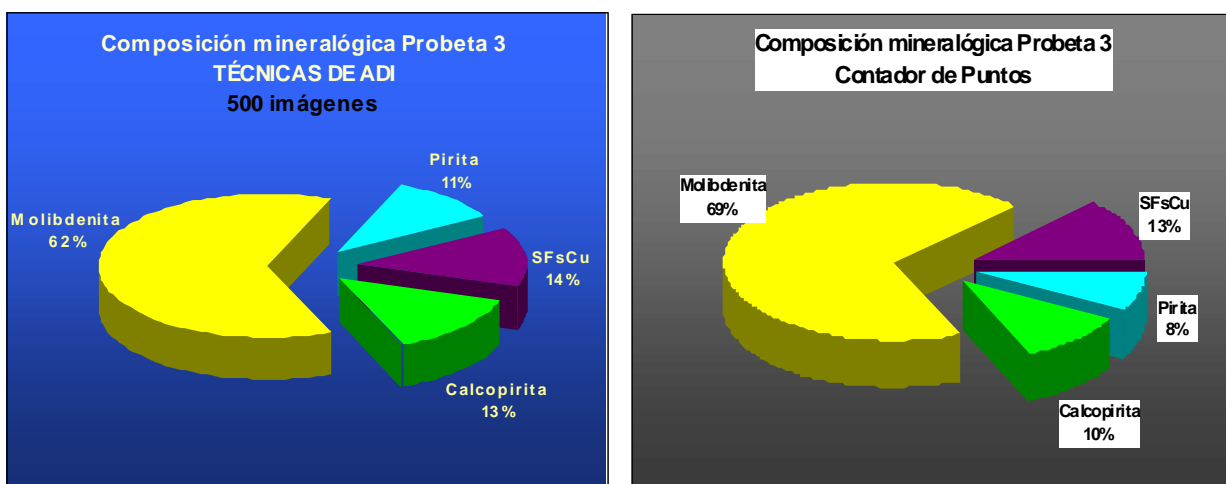


Figura 2: Cuantificación mineral: ADI vs. Contador de Puntos

Además de la comparación de los resultados de cuantificación mineral obtenidos por ambos métodos, resulta igualmente interesante realizar una reflexión económica sobre la aplicación del análisis digital de imagen frente al método manual.

Si bien es cierto que la inversión en un equipo de análisis digital de imagen supera la inversión en un contador de puntos, el tiempo invertido en la formación y dedicación de un mineralogista experto capaz de realizar estudios mineralógicos de caracterización de menas mediante contador de puntos es muy superior al necesario para realizar estos estudios mediante la aplicación de ADI.

	MÉTODO MANUAL	ADI
<i>Coste del equipo</i>	30 000 \$	70 000 \$
<i>Mano de Obra (anual)</i>	50 000 \$	25 000 \$
<i>Beneficio por probeta</i>	150 \$	150 \$
<i>Amortización</i>	8 años	8 años

Tabla 2: Datos económicos estimados: método manual vs. ADI

Teniendo en cuenta los datos que se muestran en la tabla 2, es posible hacer un análisis económico aproximado de comparación entre ambos métodos (figura 3) para determinar cuál es el número mínimo de probetas que es necesario analizar en un año para obtener beneficio económico. Evidentemente se trata sólo de una estimación aplicable al caso estudiado, susceptible de variaciones amplias según la naturaleza del problema y la mineralogía. No obstante, es una orientación que ilustra el impacto que esta metodología puede tener en muchas aplicaciones.

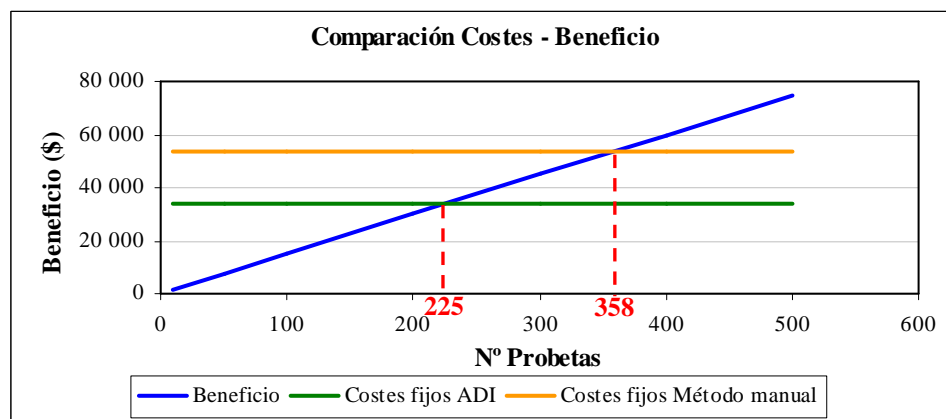


Figura 3: Comparación Costes – Beneficio Método manual vs. ADI.

Tal y como se observa en el gráfico de la figura 3, el número de probetas a analizar necesario para superar los costes fijos anuales de operación, es decir, para obtener beneficios, es mucho menor en el caso de la aplicación de análisis de imagen que en el caso de emplear un contador de puntos.

6. INNOVACIONES METODOLÓGICAS EN ADI

El gran interés que despierta la aplicación del análisis digital de imagen hace que esta técnica se encuentre en continuo desarrollo. En el Laboratorio de Microscopía Aplicada de la ETSI Minas de Madrid se está llevando a cabo en la actualidad el proyecto CAMEVA (Caracterización Automatizada de Menas mediante Visión Artificial), que introduce algunas novedades respecto a la técnica empleada en el presente estudio. La principal novedad de este proyecto es que intercala una rueda de filtros monocromadores entre la fuente luminosa y el microscopio. Se trata de 13 filtros de longitudes de onda comprendidas entre 400nm y 1000 nm con espaciado de 50 nm, de manera que permite capturar imágenes multispectrales de minerales no sólo en el espectro visible, sino también en el ultravioleta e infrarrojo cercano, dando como resultado la caracterización de los minerales por trece medidas precisas de reflectancia, evitando de esta forma posibles solapes entre los rangos de segmentación de minerales con reflectancia similar. Además el equipo cuenta con platina y enfoque automatizados, confiriendo mayor rapidez y precisión al proceso y obteniendo así resultados más fiables y precisos.

En la figura 4 se muestran los espectros de reflexión obtenidos con este equipo para cada uno de los minerales estudiados en el presente trabajo.

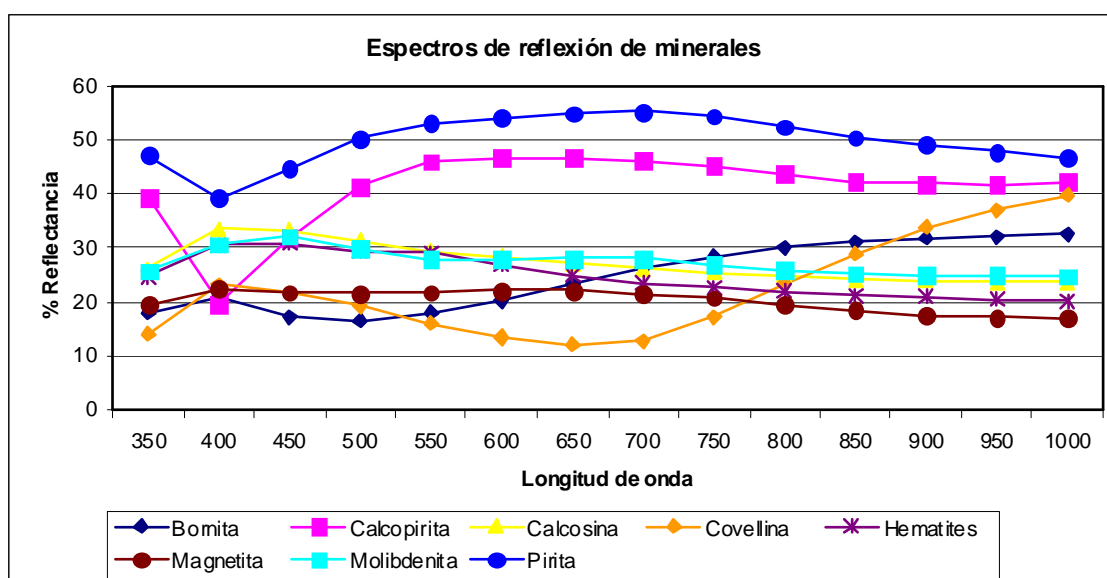


Figura 4: Espectros de reflexión de los minerales estudiados.

7. CONCLUSIONES

A través de este trabajo se ha constatado cómo un usuario sin experiencia previa es capaz de poner a punto el equipo de análisis digital de imagen y obtener resultados de cuantificación mineral comparables a los resultados obtenidos por un mineralogista experto mediante el contador de puntos. Las conclusiones del trabajo realizado son las siguientes:

1. **Puesta a punto.** Siguiendo de forma rigurosa la metodología establecida (Pirard *et al.*, 1999; Berrezueta, 2004) se ha logrado la puesta a punto del equipo de ADI, garantizando las condiciones de estabilidad necesarias para garantizar la reproducibilidad de las medidas.
2. **Rangos de Segmentación.** Ha sido posible obtener de forma fiable y estadísticamente contrastada los rangos de nivel de gris en los cuáles se segmenta cada una de las fases minerales estudiadas.
3. **Cuantificación mineral e interpretación de resultados.** Los resultados de cuantificación obtenidos por el estudio mediante ADI revelan la misma tendencia general que los resultados obtenidos por un mineralogista experto aplicando la técnica manual del contador de puntos.
4. **Aplicabilidad y rendimiento.** La automatización es el punto fuerte de la metodología de análisis de imagen y permite no sólo un gran rendimiento de trabajo, sino también una versatilidad de cálculo que no está al alcance de los métodos manuales. No obstante no debe prescindirse totalmente del apoyo del mineralogista, al menos para definir las condiciones iniciales (segmentación). Por otro lado, el empleo de técnicas de análisis de imagen frente a al contador de puntos puede suponer un sensible abaratamiento de los costes de operación para un número de muestras suficiente, fundamentalmente porque no exige la dedicación continuada de un mineralogista experimentado.
5. **Innovaciones metodológicas.** En la actualidad se está llevando a cabo una investigación en el Laboratorio de Microscopía Aplicada de la ETSI Minas de la Universidad Politécnica de Madrid, a partir de la cuál es posible caracterizar cada mineral por trece valores precisos de reflectancia, mediante un equipo totalmente automatizado, lo que supone la obtención de resultados más precisos con gran rapidez.

8. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Dr. **César Cánepa** su generosa contribución mediante el estudio mineralógico previo y la cuantificación de la mena estudiada en platina integradora. Se reconocen los apoyos del Ministerio de Educación y Ciencia (proyectos *GR-92-0135*, *UE95-007*, *UE98-0027* y *CGL2006_13688_C02_01*) y de la Comunidad de Madrid (Ayuda Red de Laboratorios, *rla207*) para la adquisición de la instrumentación, así como del Programa ALFA de la UE para la realización de la Tesis de Máster origen de este trabajo (beca del Programa Máster Internacional *Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales*, ALFAII0459FA).

9. REFERENCIAS

- Berrezueta E. (2004). Caracterización de menas mediante Análisis Digital de Imagen: Investigación y diseño de un sistema experto aplicable a problemas mineros. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Geológica. E.T.S.I. de Madrid.
- Castroviejo R., Chacon E., Múzquiz C., Tarquini, S. (1999) (a). A preliminary image analysis characterization of massive sulphide ores from the SW Iberian Pyrite Belt (Spain). Geovision. International Symposium of Imaging Applications in Geology. Liège, Bélgica. 37-40.
- Criddle A.J. & Standley C. (1993). Quantitative data file for ore minerals. Third Edition. Chapman & Hall British Museum, Londres. 635.
- Pirard E., Lebrun V., Nivart J.F. (1999). Optimal Acquisition of Video Images in Reflected Light Microscopy. Microscopy and Analysis, July 1999, pp. 9-11.